

## 論 文

UDC 621.746.047 : 531.717.1.082.74 : 65.011.56

## 連続鋳造スラブの凝固シェル厚みのオンライン非破壊測定

川島 捷宏\*・中森 幸雄\*・室田 昭治\*・曾我 弘\*<sup>2</sup>On-line Non-destructive Measurement of Solidification  
Shell Thickness of Continuous Casting Steel Slabs

Katsuhiko KAWASHIMA, Yukio NAKAMORI, Shoji MUROTA, and Hiromu SOGA

## Synopsis :

It is very important to measure solidification shell thickness of C.C. slabs for a good and fast control system of a production line. There have been so far only destructive methods and theoretical calculation for the shell thickness estimation.

We have developed the method of nondestructive, real time and quasi-continuous measurement of the shell thickness utilizing the technique of electromagnetic generation and detection of ultrasonic waves and successfully tested it in our C.C. production line.

The measurement system was installed about six meters below the molten steel level and measurements were done every one to two minutes for long time, during that time casting speed was changed. The measured results showed that this method could be applied to measure the shell thickness not only for stable casting conditions but also for dynamically changing casting conditions.

## 1. 序 論

電磁超音波は鋼材等の被試験材料に非接触的に超音波を発生・検出できることから鉄鋼製造プロセス・成品検査等、多くの応用範囲が考えられる。その原理・諸特性については既に多くの報告がある<sup>1)~7)</sup>。我々は本技術の応用の一つとしてオンライン連続鋳造凝固シェル厚み計の研究をおこなってきたが最近その開発に成功した。連続鋳造の操業中において鋳片の凝固状態を把握することは適切・効果的な連続鋳造の制御に必要度が高いと考えられる。従来、冷却水量・表面温度・鋳型抜熱量等のデータより計算する方法が開発されたが間接的な方法であるため直接的な精度の高い測定方法が望まれていた。そのため当社生産技術研究所において電磁超音波透過法による測定方法を開発し八幡製鉄所連続鋳機に設置し約5ヶ月にわたる試験運転の結果非常に良好な結果が得られたので報告する。

## 2. 電磁超音波の基本原理解

電磁超音波技術は、金属の表面に置かれた巻線コイルにより金属表面直下に誘導電流をおこしそれと磁界との

相互作用により直接金属内に超音波を発生させるもので、検出は超音波と磁界の相互作用により金属内に誘起する誘導電流をコイルによつて検出するものである。(Fig. 1 参照) 検出される信号の大きさ  $V_{R\Omega}$  をあらかじめもめるために電磁場方程式と固体内弾性波方程式を利用した理論解析をした結果次式のような結果を得た。

$$V_{R\Omega} = \frac{N_R A_R B_0 \mu_1 N_T^2 |I_T|^2}{2\rho v (1-j\beta_2) (1-2j\beta_2)} \exp\{j(\Omega t + k_2 z_2)\} \dots \dots \dots (1)$$

$V_{R\Omega}$  は高温鋼材の場合には約 20 mV となり電子工学的に増幅、信号処理等が可能なる値であることがわかつた。(1)式の導出の詳細ならびに  $V_{R\Omega}$  を計算するに必要な変数の詳細については Appendix に示す。

## 3. 測定方法

## 3.1 測定原理

連続鋳片の片側に発生用コイルを、反対側にマグネットと検出コイルを配置する。(Fig. 1) 発生用コイルに大電流パルスを送ると鋳片の表面にはパルス状の磁界の渦電流が発生する。それらは相互作用してローレンツ力を

昭和 54 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 55 年 9 月 3 日受付 (Received Sept. 3, 1980)

\* 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yawatahigashi-ku Kitakyushu 805)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)生産技術研究所 工博 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp.)

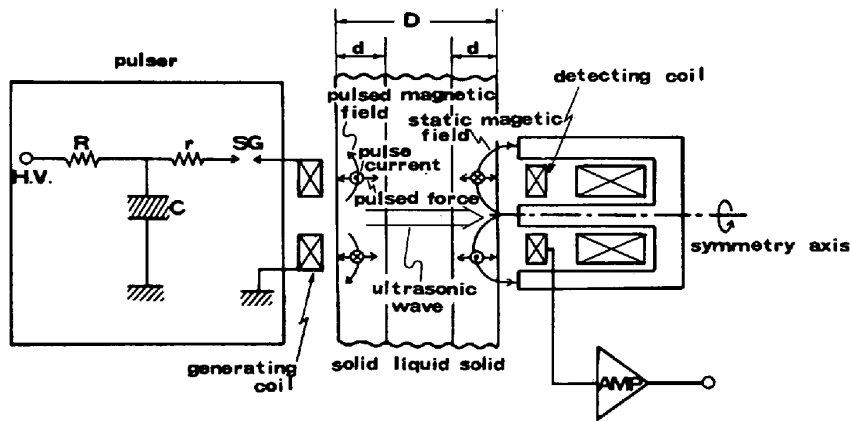


Fig. 1. Measurement of Solidification shell thickness of C. C. slabs.

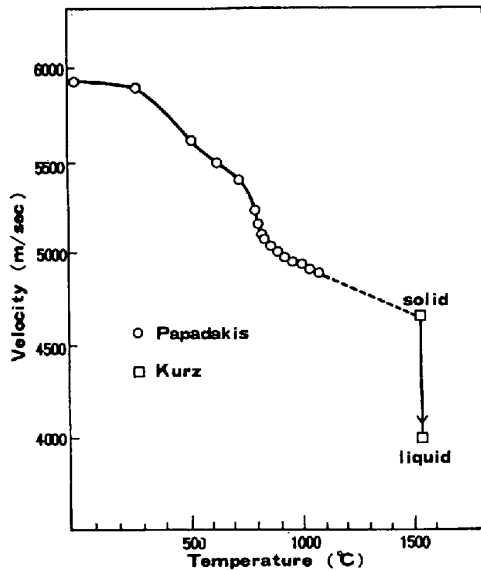


Fig. 2. Longitudinal wave velocity in steel versus temperature. [by PAPADAKIS<sup>8)</sup> & KURZ<sup>9)</sup>]

生じ縦波超音波を発生させる。Appendix の (A13) 式で示しているがこれは F II 方式であり、したがって超音波の周波数は発生用コイルに流したパルス電流の周波数の約 2 倍となる。この超音波は鋳片の固相・液相・固相の順に伝播して反対側の鋳片表面に到達して磁界と相互作用し渦電流を発生させる。その渦電流は検出用コイルにより電気信号に変換される。このようにして超音波が連鋳鋳片を透過するに要する時間  $t$  と連鋳鋳片の凝固シェル厚み  $d$  との間には次式のような関係がある。

$$t = \frac{d}{\bar{v}_s} + \frac{D-2d}{\bar{v}_1} + \frac{d}{\bar{v}_s} \dots\dots\dots (2)$$

$$\therefore d = \left( t - \frac{D}{\bar{v}_1} \right) / 2 \left( \frac{1}{\bar{v}_s} - \frac{1}{\bar{v}_1} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで

- $t$  : 透過時間 (電磁超音波透過法により測定)
- $\bar{v}_s$  : 固相中の平均音速

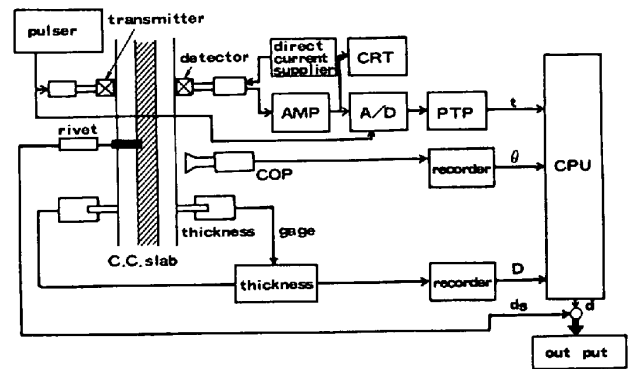


Fig. 3. Schematic diagram of measurement system.

- $\bar{v}_1$  : 液相中の平均音速
- $D$  : 鋳片厚み
- $d$  : 凝固シェル厚み

縦波超音波の固相中での伝播速度は温度と共に変化するがその代表的な変化のようは Fig. 2 のようである<sup>8)9)</sup>。Fig. 2 によれば約 900°C 以上の温度においては音速  $v$  と温度  $T$  との関係は次式であらわされる。

$$V = 5520 - 0.615T \dots\dots\dots (4)$$

したがって  $\bar{v}_s$  は固相の平均温度  $\bar{T}$  がわかれば (4) 式により算出できる。 $\bar{T}$  は表面温度実測値と鋼の凝固温度より推定することができる。液相の温度はほぼ一定と考えられているので、液相中の平均音速  $\bar{v}_1$  もある一定値を持つと考えられる。Fig. 2 によれば  $\bar{v}_1 = 3900 \text{ m/s}$  である。

### 3.2 測定システム

Fig. 3 に凝固厚み測定システムを示す。それは大別すれば電磁超音波装置、表面温度計、鋳片厚み計より構成されており連鋳機のメニスカスより約 6m の位置に設置された。

#### 3.2.1 電磁超音波装置

電磁超音波装置は送受信端、高圧パルサー、マグネッ

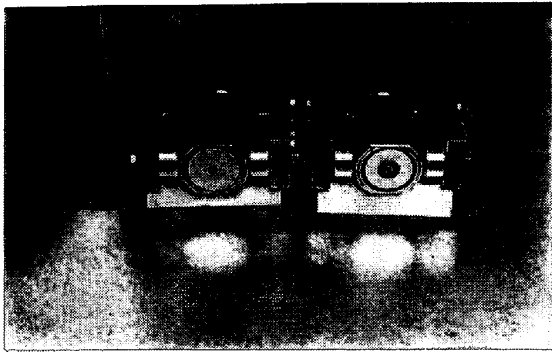


Photo. 1. Transducers.  
(Transmitter : left, Receiver : right)

ト用直流電源装置, 増幅器, 超音波波形表示用オシロスコープ, 波形をデジタル化し記憶するデジタルウェーブメモリ, 紙テープさん孔器より構成されている. 送受信端 (Photo. 1) は  $40\text{ mm}\phi \times 80\text{ mm}$  であり細い支持棒の先端にとりつけられ約  $30\text{ s} \sim 2\text{ min}$  ごとに凝固シェル厚み計測のために鑄片に近づけられる. 送受信端には小型の耐熱ローラーがとりつけられそれによつて鑄片表面から約  $2\text{ mm}$  の位置に数秒間保持される. この時間内に送受信用コイルに大電流パルスを送る. 測定原理の項で説明したように鑄片表面に超音波が発生し, 鑄片を透過

し受信コイルによつて検出され増幅器で増幅される. 増幅された信号はオシロスコープとウェーブメモリに入力される. またウェーブメモリには送信波も入力されている. ウェーブメモリの出力は紙テープさん孔器によつて紙テープに記録され, 紙テープを計算機によつて処理すれば透過時間  $t$  を正確にもとめることができる. オシロスコープに記録された電磁超音波の発生波形ならびに透過波形を Photo. 2-(a), (c)に, ウェーブメモリによつて紙テープに記録された発生ならびに透過波形を再生したものを Photo. 2-(b), (d) に示す.

Appendix において証明されているが, Photo. 2 により透過波形の周波数は発生波形の周波数の 2 倍であることがわかる. 透過時間  $t$  は両波形のピークの時間差をもとめそれを演算し求めた. 高圧パルサー, 増幅器等の各装置を Photo. 3 に示す.

### 3.2.2 表面温度計

表面温度計は鑄片固相の平均音速を求めるために設置されたものであり, 放射型温度計を使用し時々ランド型温度計により補正をおこなつた.

### 3.2.3 鑄片厚み計

鑄片厚み  $D$  を求めるために設置したものである.  $D$  は

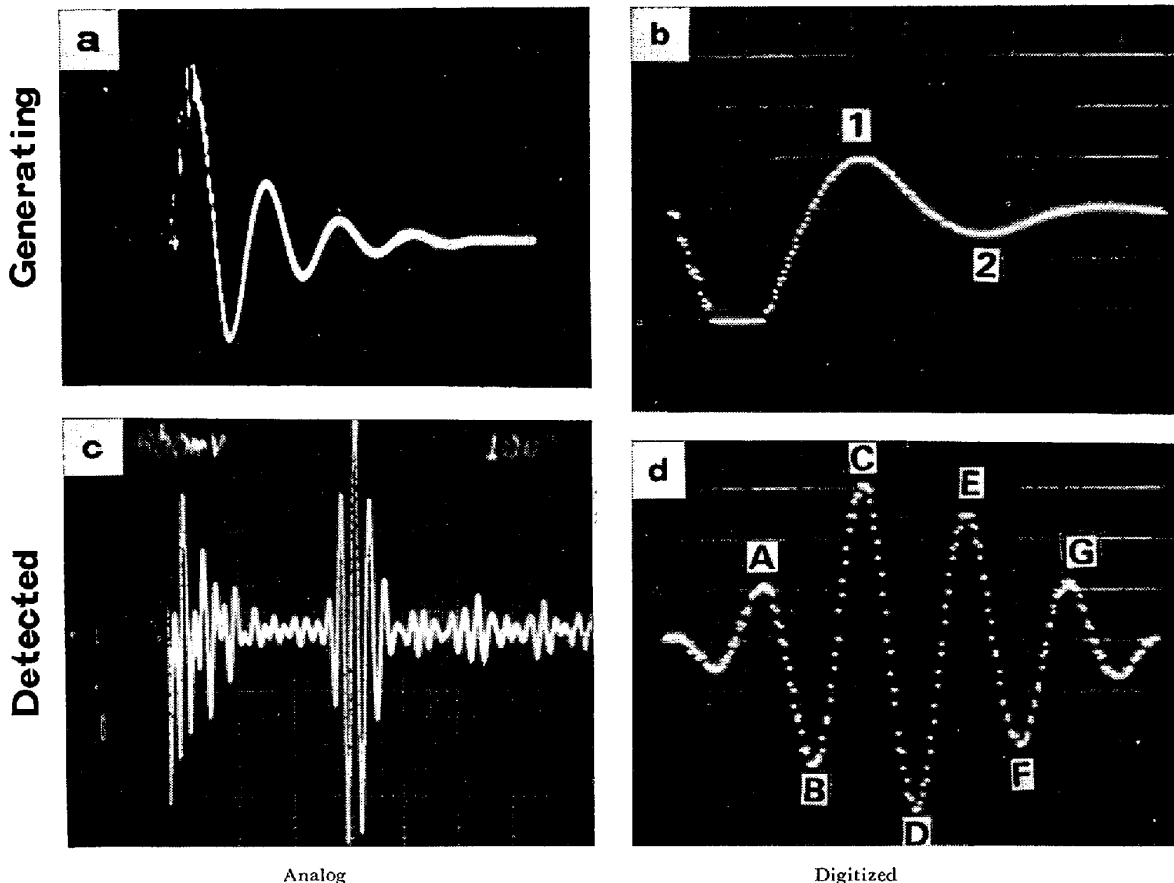


Photo. 2. Generating and detected wave forms.

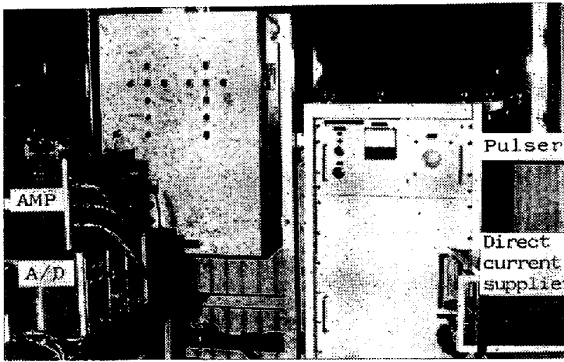


Photo. 3. Apparatus for shell thickness measurement.

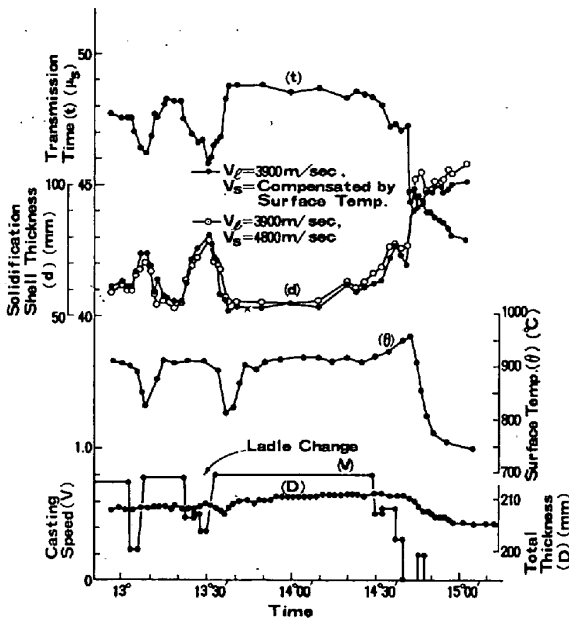


Fig. 4. Solidification shell thickness and others obtained by the measurement system.

鑄造過程においてバルジングにより一定ではなく取り付け場所、引き抜き速度、2次冷却水、鋼種等によって変化するため実測する必要がある。マグネスケールを利用したロールタッチ式のものを使用した。

#### 4. 測定結果と考察

代表的な測定結果を Fig. 4 に示す。透過時間  $t$ 、鑄片表面温度  $\theta$ 、鑄片厚み  $D$ 、それらより計算された凝固シェル厚み  $d$ 、ならびに鑄片引き抜き速度  $V$  等を準連続的 (約 2 min 間隔) に測定した結果が約 2 h 以上にわたって記録されている。鑄片引き抜き速度は 0.2 m/s から 0.9 m/s の間を変化させられ最終的には停止させられた。すべての測定は連続鑄造の最中ならびに鑄片引き抜き停止後もおこなわれ内部まで完全に凝固するのに十分な時間までつけられた。

凝固シェル厚み  $d$  を (3) 式によつて計算する際に必要な液相での平均音速  $\bar{v}_l$  は 3900 m/s とし、固相での平

均音速  $\bar{v}_s$  は (4) 式によつて算出した。その際必要な固相の平均温度  $\bar{T}$  は、固相中での鑄片表面から凝固界面にかけての温度分布がほぼ直線的であるという仮定のもとに表面温度実測値  $\theta$  と凝固温度の平均値により求めた。

このようにして得られた凝固シェル厚み  $d$  を黒丸であらわす。また  $\bar{v}_s$  が一定値 4800 m/s に等しいと仮定して得られた結果を白丸であらわす。両結果には大きな差がないがこれは固相の平均音速  $\bar{v}_s$  を温度によつて補正することが必ずしも必要でないことを示している。 $d$  の時間的な変動に着目すると興味深い。鑄片引き抜き速度が一定 (0.9 m/s) の場合には  $d$  はほぼ一定しておりその値は約 40 mm である。また Fig. 4 の横軸の 13°00' ならびに 13°30' 頃に鑄片引き抜き速度を短時間減少させたところ凝固シェル厚み測定値もその直後から敏感に増加しはじめ、鑄片引き抜き速度がもとにもどると測定値も旧に復した。鑄片引き抜き速度は鑄片がメニスカスから電磁超音波測定点まで移動するに要する時間と関係があるので引き抜き速度の変化と凝固シェル厚み測定値の変化が上述のような関係にあることは当然予想できる。

しかし従来の凝固モデル計算による方法では、このような短時間の鑄造条件の変化による過渡的な状態における凝固シェル厚みを定量的に精度よく推定することは容易ではない。本測定方法では定常的鑄造か過渡的鑄造にかかわらずいずれの場合でもかわりなく測定が可能であることが上述の結果よりわかる。14°40' 頃に連続鑄造が停止されたがその直後から凝固シェル厚み測定値  $d$  は増加しはじめ以後どんどん増加している。これは鑄片が停止したため測定点において凝固シェルが時間の経過と共にどんどん厚くなり最終的に完全に凝固したことに対応している。

これらの測定結果は電磁超音波透過法による凝固シェル厚み測定装置が敏感かつ再現性よく凝固厚みをとらえていることを示している。

以上やや定性的に論じたが鋳打ち法による凝固シェル厚みの測定も同時におこない両測定法の定量的対比もおこなつた。Fig. 4 に示した実験とは別に鑄造速度が 0.55 m/min の操業条件で電磁超音波測定位置と同じ位置で打ち込んだ鋳の溶解状況のサルファプリントを Photo. 4 に示す。鋼種は中炭アルミキルド鋼である。既によく知られているように鋳打ち込み時の鑄片内部の固相、固液共存相、液相等は鋳の溶解状況から判別可能である。Photo. 4 において鋳の輪郭がはつきりしている範囲が固相、鋳が溶解した状況が認められる範囲が固液共存相、鋳の痕跡の認められない範囲が液相であるとする、固相の厚さは 78.3 mm、固液共存相の厚さは約 11 mm で

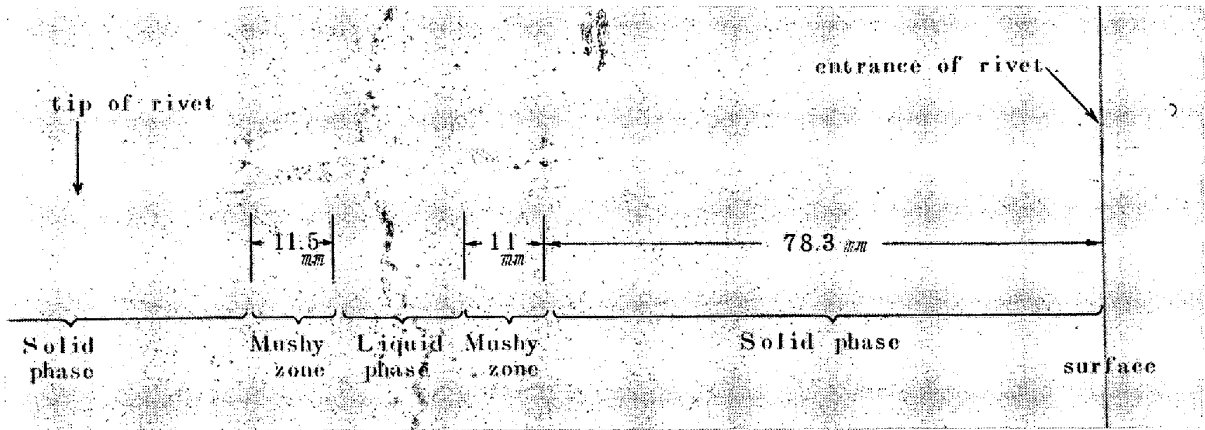


Photo. 4. S-print of driven rivet.

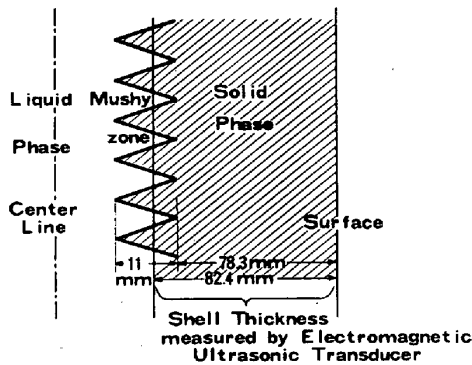


Fig. 5. Model of shell thickness measurement by electromagnetic ultrasonic transducer.

ある。測定位置、鋸打ち込み位置はメニスカスより 6mm の位置であるため鋸造時間は  $6/0.55=10.9$  min であり、これらの固相厚み、固液共存相厚みの値は同じ鋸造時間に換算した場合、川和<sup>10)</sup>、大橋<sup>11)</sup>らが得た値とほぼ同じである。ところが同時に測定した電磁超音波法による凝固シェル厚みは 82.4 mm であった。これは鋸打ち法によつて得られた固相厚さ 78.3 mm よりは約 4.1 mm 大きく、固液共存相厚み 11 mm を加えた値 89.3 mm よりは約 6.9 mm 小さい。これらの関係は Fig. 5 に示すとおりである。固液共存相は固相側から伸びた dendライトと液相が共存している相であるため音速は固相の音速と液相の音速との中間の値をとると考えるのが自然であり上記のような結果が出たものと考えられる。固液共存相の音速を定量的に厳密に論じることは困難であるが、Photo. 4, Fig. 5 より電磁超音波法は固液共存相とほぼ  $4:6=4.1\text{ mm}:6.9\text{ mm}$  にわたるような位置に仮想的に存在する理想的な平面状の固液界面によつてきまる凝固シェル厚みを測定するものであると考えられる。したがつて Fig. 4 に示した測定値もこのような理想的な意味での測定値である。しかしながらこの理想的な意味での凝固シェル厚みは上述のように固相、固液共

存相と一定の関係にあるため連鋸鋸片の凝固に関する有益な情報を提供するものであることには変わりはないと言える。

### 5. 凝固シェル厚み測定精度の検討

凝固シェル厚みを測定する際にその測定精度に影響を及ぼす要因は

- (1) 透過時間の測定精度
- (2) 鋸片厚み  $D$  の測定精度
- (3) 固相平均音速  $v_s$  の推定精度
- (4) 液相平均音速  $v_l$  の推定精度

等である。凝固シェル厚み  $d$  は次式であらわされる。

$$d = \left( t - \frac{D}{v_l} \right) / 2 \left( \frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_l} \right) \equiv f(t, v_l, v_s, D) \dots \dots (5)$$

その誤差は次式であらわされる。

$$\begin{aligned} |d| \leq & \left| \frac{\partial f}{\partial t} \Delta t \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial v_l} \Delta v_l \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial v_s} \Delta v_s \right| \\ & + \left| \frac{\partial f}{\partial D} \Delta D \right| = \left| \frac{1}{2} \frac{v_l v_s}{v_l - v_s} \Delta t \right| \\ & + \left| \frac{1}{2} \frac{t v_s (v_l - v_s) - (t v_l v_s - D v_s)}{(v_l - v_s)^2} \Delta v_l \right| \\ & + \left| \frac{1}{2} \frac{(t v_l - D) (v_l - v_s) + (t v_l v_s - D v_s)}{(v_l - v_s)^2} \Delta v_s \right| \\ & + \left| -\frac{1}{2} \frac{v_s}{v_l - v_s} \Delta D \right| \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

各要因の測定精度への影響を具体的に検討する。鋸片の表面温度を  $850^\circ\text{C}$ 、凝固温度を  $1500^\circ\text{C}$  としそれぞれの音速を  $5000\text{ m/s}$ 、 $4600\text{ m/s}$  とする。(Fig. 2 参照) 固相の平均温度が表面温度と凝固温度の平均温度であらわされるとすると

$$\begin{aligned} \text{固相平均温度} &= \frac{1}{2} (850^\circ\text{C} + 1500^\circ\text{C}) \\ &= 1175^\circ\text{C} \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

音速の温度による変化がこの温度範囲ではほぼ直線的で

Table 1. Partial derivatives of shell thickness with respect to the variables.

d	t	$\frac{1}{2} \frac{V_L V_S}{V_L - V_S}$	$\frac{1}{2} \frac{(-tV_S^2 + DV_S)}{(V_L - V_S)^2}$	$\frac{1}{2} \frac{(tV_L^2 - DV_L)}{(V_L - V_S)^2}$	$\frac{1}{2} \frac{V_S}{V_L - V_S}$
mm 20	$\mu s$ 49.3	$1.04 \times 10^4$	$1.09 \times 10^{-4}$	$1.86 \times 10^{-5}$	2.66
40	46.4	$1.04 \times 10^4$	$6.73 \times 10^{-5}$	$4.58 \times 10^{-5}$	2.66
80	43.6	$1.04 \times 10^4$	$2.75 \times 10^{-5}$	$7.21 \times 10^{-5}$	2.66

Table 2. Causes for the shell thickness measurement error.

Shell thickness	Shell thickness measurement error	The minimum errors allowed for the variables				
		$\Delta d$	$\Delta V_S$	$\Delta \theta$	$\Delta t$	$\Delta D$
20mm	2mm	108m/sec	176 °C	0.2 $\mu$ sec	0.8mm	
40	2	43.7	71	0.2	0.8	
80	2	27.7	45	0.2	0.8	

あると考えられるので平均音速は

$$\bar{v}_s = \frac{1}{2} (5000 \text{ m/s} + 4600 \text{ m/s}) = 4800 \text{ m/s} \dots\dots\dots (8)$$

となる。

液相温度はほぼ一定とし音速  $\bar{v}_l$  もほぼ一定であるとする。

$$\bar{v}_l = 3900 \text{ m/s} \dots\dots\dots (9)$$

また鋳片厚みを 200 mm とすれば各凝固厚みに対する各要因の誤差係数は Table 1 で表される。したがって凝固シェル厚み測定誤差を 2 mm 以内におさえるに各要因に必要とされる測定精度は Table 2 のようになる。この結果より、例えば凝固厚みが 40 mm 程度の場合には固相の平均音速を補正するための表面温度の測定精度は 71 °C でよく表面温度の測定は大雑把な精度でよいことがわかる。また時間精度は 0.2  $\mu$ s であり最近の時間測定技術の極めてよい精度から考えると問題はない。鋳片厚みの測定精度は約 0.8 mm であり、これは所要の凝固シェル厚み測定精度 2 mm の約 2 倍であるがこれは現状の鋳片厚みの測定技術としては困難なものではないと思われる。

(5) 送受信端のミスセッティングの影響

送受信端コイルと鋳片表面とのギャップ変動は透過波の信号の大きさに影響するが透過時間測定値には影響を及ぼさない。というのは信号は空気中では電磁波の速度で伝わるからである。一方送受信コイルが Fig. 6 のようにずれている場合は誤差の要因となるが定量的には影響は小さい。例えば鋳片厚みが 200 mm で、ずれが 10 mm である場合には、

$$\epsilon = \frac{\sqrt{200^2 + 10^2}}{200} = 1.001 \dots\dots\dots (10)$$

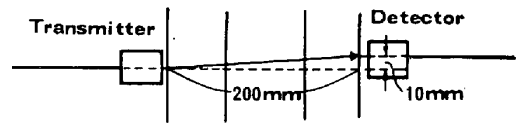


Fig. 6. Shell thickness measurement error due to mis-setting of a transmitter and a receiver.

となり透過時間測定に約 0.1% (0.05  $\mu$ s) の影響を及ぼすのみであり、これは無視できるものである。

6. 送受信端コイルの耐熱・耐久性

送受信端コイルの先端は薄い耐熱性材料で保護しかつ少量の流水により冷却された。熱負荷も測定頻度が小であるので (約 30 s ~ 2 min ごとに約 2 s 間鋳片に近接) 耐熱性の問題はないことがわかった。その他、送受信端コイルの保持・移動装置設計に関しては CC マシンのチェンバー内での条件 (水、水蒸気、スケール堆積等) に耐え得るような技術的な配慮をすると同時に、送受信端コイルが過大の力で鋳片に衝突するようなことがないように配慮しておく必要がある。

7. おわりに

電磁超音波透過法を利用した CC 鋳片の凝固シェル厚み計を開発した。小型でありオンラインで非破壊的、準連続的に凝固シェル厚みを測定することが可能である。本計測装置を多点に利用するための最適配置方法や、伝熱モデル計算との効果的な結合などの利用技術開発により従来より確度の高い CC の凝固状態の把握が可能となると思われる。それによりきめのこまかい CC の引き抜き制御、冷却水制御その他の制御が可能となり CC 鋳片の品質の高位安定のもとに鋳造の高速化をはかり、生産性を設備限界まで向上させることが可能となると思われる。今後の本技術の一層の発展が望まれる。

Appendix 電磁超音波発生・検出能率の解析

電磁超音波の発生能率の解析は既に電磁場と超音波の相互作用を無視することによりなされた例がある。またその解析においては検出能率の算出に相反定理が使用されている<sup>9)</sup>。筆者らは相互作用を考慮に入れて解き、また物理的現象として把握するために検出能率も相反定理を使用せず直接的に導いた。

1. 基本方程式

非磁性体金属で非常な低温、高周波数でなければ超音波を発生させる源となる力は渦電流と磁界との相互作用によるローレンツ力のみであると考えてよい。このような場合に解析に必要な方程式は次の 4 式である。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \dots\dots\dots (A1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \dots\dots\dots (A2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma_1 \left( \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial t} \times \mathbf{B} \right) \dots\dots\dots (A3)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial t^2} = C \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial z^2} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \dots\dots\dots (A4)$$

(A1), (A2)式はマクスウェルの電磁場方程式である。(A3)式はオームの法則であり, (A4)式は弾性波の方程式であるが電磁場と弾性波の相互作用をあらわす項  $\sigma_1 \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial t} \times \mathbf{B}$  が付加されている。しかしながら(A1)~(A4)式を解いた結果とこの付加項を無視した場合の結果は大差ないことがわかつたので以下では次の4式を利用した。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \dots\dots\dots (A1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \dots\dots\dots (A2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma_1 \mathbf{E} \dots\dots\dots (A5)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial t^2} = C \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial z^2} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \dots\dots\dots (A4)$$

2. 発生能の解析

電磁超音波の発生の基本的な解析をおこなうためにできるだけ簡単に, かつ本質を見失うことのないように平面電磁波により平面超音波が発生する場合の解析をおこなつた。Fig. A1-(a) において半無限に広がる金属媒体(導電率:  $\sigma_1$ , 透磁率:  $\mu_1$ ) の表面上に直線導線の平板状集合体(単位長さあたり  $N_T$  本) に交番電流  $I_T$  (角周波数:  $\omega$ ) を流す。また紙面に垂直方向に一様な静磁

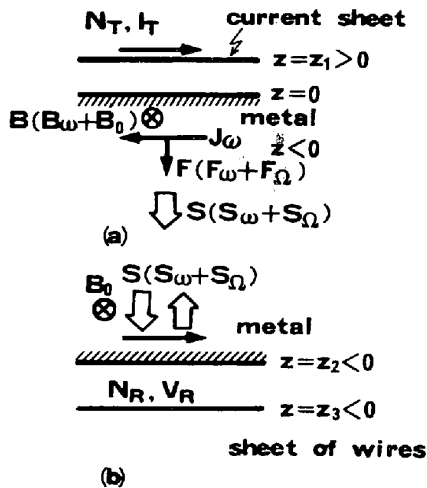


Fig. A1. Theoretical analysis of electromagnetic generation and detection of ultrasonic waves.

界  $B_0$  が与えられている。このような場合に次のような解が得られる。 $I_T$  により金属媒質中に誘導生起する電流密度  $J_\omega$ , 磁束密度  $B_\omega$  は

$$J_\omega = -\frac{N_T I_T (1+j)}{\delta} \exp\left(\frac{1}{\delta} z\right) \exp\left\{j\left(\omega t + \frac{1}{\delta} z\right)\right\} \dots\dots\dots (A6)$$

$$B_\omega = \mu_1 N_T I_T \exp\left(\frac{1}{\delta} z\right) \exp\left\{j\left(\omega t + \frac{1}{\delta} z\right)\right\} \dots\dots\dots (A7)$$

一方ローレンツ力は

$$F = J_\omega \times B = J_\omega \times (B_0 + B_\omega) \dots\dots\dots (A8)$$

(A8)式の第一項よりは  $F_\omega$  (角周波数  $\omega$ ) が生ずる。

$$F_\omega = J_\omega \times B_0 = -\frac{B_0 N_T I_T (1+j)}{\delta} \exp\left(\frac{1}{\delta} z\right) \exp\left\{j\left(\omega t + \frac{1}{\delta} z\right)\right\} \dots\dots\dots (A9)$$

(A8)式の第2項よりは  $F_\Omega$  (時間的に変化しない) と  $F_\Omega$  (角周波数:  $\Omega = 2\omega$ ) が生ずる。

$$F_\Omega = -\frac{\mu_1 N_T^2 |I_T|^2}{4\delta_2} \exp\left(\frac{1}{\delta_2} z\right) \dots\dots\dots (A10)$$

$$F_\Omega = -\frac{\mu_1 N_T^2 |I_T|^2 (1+j)}{4\delta_2} \exp\left(\frac{1}{\delta_2} z\right) \exp\left\{j\left(\Omega t + \frac{1}{\delta_2} z\right)\right\} \dots\dots\dots (A11)$$

$F_\omega, F_\Omega$  により平面超音波  $S_\omega$  (角周波数  $\omega$ ),  $S_\Omega$  (角周波数  $\Omega = 2\omega$ ) が発生する。

$$S_\omega = \frac{B_0 N_T I_T}{\rho v} \frac{j}{1-j\beta} \exp\left\{j(\omega t + kz)\right\} \dots\dots (A12)$$

$$S_\Omega = \frac{\mu_1 N_T^2 |I_T|^2}{4\rho v \Omega} \frac{j}{1-j\beta_2} \exp\left\{j(\Omega t + k_2 z)\right\} \dots\dots\dots (A13)$$

このように2種の周波数を持つ超音波  $S_\omega, S_\Omega$  は Fig. A1-(a) において下方に進行していく。以後  $S_\omega$  を F I 方式,  $S_\Omega$  を F II 方式による電磁超音波と呼ぶ。

3. 検出能の解析

Fig. A1-(b) には検出能率を解析するために Fig. A2-(a) と同様の半無限金属媒体, 直線導線の平板状集合体(単位長さあたり  $N_R$  本), を示している。平面超音波  $S_\omega, S_\Omega$  が上方から進行し境界で反射し再び上方へもどつていく。 $S_\omega, S_\Omega$  は検出用の静磁界  $B_0$  との相互作用により電流を発生させ, 直線導線の平板状集合体の面積  $A_R$  あたりにそれぞれ誘起電圧  $V_{R\omega}, V_{R\Omega}$  を発生させる。

$$V_{R\omega} = -\frac{2N_R A_R B_0^2 N_T I_T}{\rho v (1-j\beta)^2} \exp\left\{j(\omega t + kz_2)\right\} \dots\dots (A14)$$

$$V_{R\Omega} = - \frac{N_R A_R B_0 \mu_1 N_T^2 |I_T|^2}{2\rho v (1-j\beta_2) (1-2j\beta_2)} \exp\{j(\Omega t + k_2 z_2)\} \dots\dots\dots (A15)$$

ただし  $\delta = \sqrt{2/\omega\mu_1\sigma_1}$ ,  $\delta_2 = \delta/2$ ,  $\rho$ : 密度,  $v$ : 音速,  
 $k = \omega/v$ ,  $k_2 = \Omega/v$ ,  $\beta = k_2\delta^2/2$ ,  $\beta_2 = k_2^2\delta_2^2/2$ .

我々は発生のために静磁界の不要な, したがってマグネットの不要な FII 方式を採用した. したがって (A15) 式により電磁超音波透過法において得られる信号の大きさが定量的に計算できる. 例として高温の鋼の場合に得られる信号の大きさ  $V_{R\Omega}$  を計算してみる. 送信コイルの条件として  $N_T = 1000$  本/m,  $I_T = 1000$  A, 受信コイルの条件として  $N_R = 6000$  本/m,  $A_R = 10^{-3}$  m<sup>2</sup> 等を採用する. 受信用の静磁界として 0.2 Wb/m<sup>2</sup> を採用する. 高温の鋼材の電気伝導度はおよそ  $\sigma_1 = 8 \times 10^6$  Mho/m であり, また高温では非磁性体であるので透磁率は  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m である. 音速はおよそ  $V = 4800$  m/s, 密度は 7500 kg/m<sup>3</sup>, また電磁超音波の周波数を 400 kHz とすると  $\Omega = 2\omega = 2 \times \pi \times 400 \times 10^3$  となる. これらを (A16) 式に代入すると

$$|V_{R\Omega}| = 20 \text{ mV} \dots\dots\dots (A16)$$

が得られる. 実際には平面波でないため発生・検出コイルと金属表面とのギャップが増大すると変換能率は小となり, また鋼中で超音波が拡散や減衰をするため  $|V_{R\Omega}|$  はより小さい値となるが基本的にはこの値により推定可能である. また 20 mV という値は電子工学的には十分増幅可能な値である.

記 号

- $\nabla$ : ハミルトンの演算子 (m<sup>-1</sup>)
- E**: 電界強度 (V/m)
- B**: 磁束密度 (Wb/m<sup>2</sup>)
- H**: 磁界強度 (AT/m)
- J**: 電流密度 (A/m<sup>2</sup>)
- D**: 電束密度 (C/m<sup>2</sup>)
- t*: 時間 (s)
- $\sigma_1$ : 電気伝導度 (Ω/m)
- $\mu_1$ : 透磁率 (H/m)
- $S_\omega, S_\Omega, S$ : 弾性波による変位ベクトル (m)
- $\rho$ : 比重 (kg/m<sup>3</sup>)
- C*: 弾性係数 (N/m<sup>2</sup>)
- v*: 音速 (m/s)
- z*: 表面からの深さ (m)
- $N_T$ : 発生用の直線導線の平板状集合体における

- 単位長さあたりの直線導線の本数 (m<sup>-1</sup>)
- $N_R$ : 検出用の直線導線の平板状集合体における単位長さあたりの直線導線の本数 (m<sup>-1</sup>)
- $A_R$ : 検出用の直線導線の平板状集合体の面積 (m<sup>2</sup>)
- $I_T$ : 発生用の電流 (A)
- $V_{R\omega}$ : 検出信号電圧 (V)
- $\omega$ : 角周波数 (S<sup>-1</sup>)
- $\Omega$ : 角周波数の 2 倍 (=2 $\omega$ ) (S<sup>-1</sup>)
- $B, B_0, B_\omega$ : 磁束密度 (Wb/m<sup>2</sup>)
- $J_\omega$ : 誘導電流密度 (A/m<sup>2</sup>)
- $\delta$ : 高周波電磁界の浸透深さ (m)
- $\delta_2$ : 高周波電磁界の浸透深さの 1/2 (m)
- k*: 角周波数と音速の比 (=ω/*v*) (m<sup>-1</sup>)
- $k_2$ : *k* の 2 倍 (=2*k*) (m<sup>-1</sup>)
- $F, F_\omega, F_\Omega, F_\theta$ : ローレンツ力 (N/m<sup>3</sup>)
- $\beta, \beta_2$ : 高周波電磁界の浸透深さと超音波波長の比の 2 乗に比例する係数 (-)
- j*: 単位純虚数 (-)
- D*: 鑄片の厚さ (m)
- d*: 凝固シェルの厚さ (m)
- $\bar{v}_s$ : 鑄片凝固相の縦波平均音速 (m/s)
- $\bar{v}_l$ : 鑄片液相の縦波音速 (m/s)

文 献

- 1) K. O. LEGG and D. J. MEREDITH: J. Phys., 3 (1970), p. L61
- 2) H. WUSTENBERG: 6th International Conference on NDT, 6 (1970), p. 37
- 3) B. W. MAXFIELD and J. K. HULBERT: Proc. 10th Symposium on NDE, San Antonio, April (1975), p. 44
- 4) K. KAWASHIMA and R. W. McCLUNG: Mat. Eval., 34 (1976) 4, p. 81
- 5) K. KAWASHIMA: J. Acoust. Soc. Amer., 60 (1976) 2, p. 365
- 6) K. KAWASHIMA: J. Acoust. Soc. Amer., 60 (1976) 5, p. 1089
- 7) G. J. PARKINSON and D. M. WILSON: Brit. J. NDT, July (1977), p. 178
- 8) E. P. PAPADAKIS, L. C. LYNNWORTH, K. A. FOWLER and E. H. CARNEVALE: J. Acoust. Soc. Amer., 52 (1972) 3, p. 850
- 9) W. KURZ und B. LUX: Arch. Eisenhüttenw., 39 (1968), p. 521
- 10) 川和高穂, 佐藤秀樹, 宮原 忍, 根本秀太郎: 鉄と鋼, 60 (1974) 2, p. 206
- 11) 大橋徹郎, 浅野鋼一: 鉄鋼基礎共同研究会シンポジウム